

کاهش رول شناور همزمان با استفاده از ژایرواستابلایزر و جابه‌جایی جرم اکتیو در شناور ۶ درجه آزادی بر پایه استاندارد ناتو

محمد مهدی پناهیان*
رامبد رستگاری**

چکیده:

در میان حرکات شناور، کاهش دامنه و افزایش فرکانس حرکات شناور در راستای رول، پیچ و هیو از اهمیت بسزایی برخوردار است. در سال‌های اخیر که تجهیزات پایدارساز جدیدی ابداع نشده است، محققان به توسعه روش‌های کنترل این حرکات روی آورده‌اند. در این تحقیق به بررسی رول شناور که تأثیر بیشتری در راحتی خدمه، مسافران و انجام برخی از عملیات‌های شناورهای نظامی دارد پرداخته خواهد شد. در ادامه سعی شده تا با حل معادلات حرکت شناور تک بدنه با در نظر گرفتن شرایط باد و موج در ۶ درجه آزادی تحلیل دقیق‌تری از حرکت شناور در هنگام پایداری رول شناور به وسیله ژایرواستابلایزر و جابه‌جایی جرم متحرک به صورت اکتیو حاصل نمود. در پایان با مقایسه معیارهای استاندارد ناتو برای انجام برخی از عملیات‌های نظامی، میزان اثربخشی پایداری رول در انجام عملیات‌های نظامی شناور بررسی خواهد شد.

واژگان کلیدی:

پایداری رول، کنترل اکتیو، ژایرواستابلایزر، جرم جابه‌جاشونده، استاندارد ناتو

۱. مقدمه

ندارند. هریک از سیستم‌های مذکور دارای معایب و مزیت‌هایی هستند، سیستم‌های خارجی در حالت سکون کارایی نداشته و درگ هیدرودینامیکی ایجاد می‌کنند ولی سبک بوده و جرم کمی دارند، در مقابل سیستم‌های داخلی در حالت سکون نیز کارآمد بوده و دارای جرم بیشتر و قیمت بالاتری هستند [۱]. مطابق با استاندارد ناتو در برخی از عملیات‌ها در شناورهای نظامی محدودیت‌هایی در میزان حرکات رول، پیچ و هیو شناور وجود دارد. از جمله در عملیات‌های نشست و برخاست هلی‌کوپتر، جابه‌جایی هلی‌کوپتر بر روی عرشه، جابه‌جایی با اتصال بین دو شناور، پرتاب موشک‌های هدایت شونده، پرتاب اژدر، شلیک توپ، جابه‌جایی مهمات و ... حرکات شناور باید کنترل و پایدار شود [۲]. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از کنترل دو تجهیز ژایرواستابلایزر و جسم جابه‌جاشونده به صورت اکتیو حرکت رول یک شناور را در محدوده عملیاتی پایدار نمود. حل معادلات حرکت در ۶ درجه آزادی و رصد تمامی حرکات شناور

اولین بار در اواسط قرن ۱۹ میلادی حرکت رول شناورها مورد توجه قرار گرفت. با حذف موتورهای بخار و بادبان‌ها به‌عنوان نیروی محرکه تغییرات اساسی در جانمایی شناورها حاصل شد و بهینه‌سازی حرکات عرضی شناور پس از این تغییرات مورد توجه جدی واقع گردید. در طول دو قرن، تجهیزات مختلفی برای پایداری رول شناور ابداع شد ولی آخرین روش در سال ۱۹۷۰ میلادی ابداع گردید که در آن از سکان برای کاهش حرکت رول شناور استفاده شد. پس از آن توسعه روش‌های کنترلی مورد توجه بیشتری قرار گرفت. تجهیزاتی که از طریق اثرات هیدرودینامیکی باعث کاهش رول می‌شوند عبارتند از شاه تیر اصلی، بالک، کنترل سکان و تریم تب که در داخل آب قرار دارند و تجهیزاتی که داخل شناور قرار گرفته و باعث پایداری رول می‌شوند عبارتند از ژایرو استابلایزر و جابه‌جایی جرم (جابه‌جایی مایع در مخازن یو شکل و جابه‌جایی جسم جامد) که با آب خارج شناور تماس

* نویسنده مسئول - کارشناس ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند

** استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند

در این تحقیق مورد انتظار است.

برای حل معادلات ۶ درجه آزادی حرکت شناور، شبیه‌سازی شرایط محیطی شامل در نظر گرفتن طیف نامنظم امواج دریا و باد بوده و در شبیه‌سازی دینامیک شناور، نیروها و گشتاورهای سکان، پروانه، جسم جابه‌جاشونده، ژایرواستابلایزر و همچنین مقاومت استاتیکی و دینامیکی شناور محاسبه شده است.

۲ روش تحقیق

در این تحقیق از نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب^۱ و ویرایش ۲۰۱۲ برای برنامه‌نویسی معادلات حرکت کشتی و حل آن استفاده شده و برای صحت‌گذاری کدنویسی صورت گرفته پارامتر مجذور میانگین مربعات^۲ از نرم افزار مکسرف^۳ و کد برنامه متلب با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا خطای کد نوشته‌شده در برنامه متلب به دست آید.

۳ فعالیت و اقدامات اصلی طرح تحقیق

۱-۳ بررسی اثر موج

نیروها و گشتاورهای اعمال شده به شناور از طرف امواج نامنظم به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته شده‌اند. طیف‌های چگالی انرژی بیانگر مقدار انرژی امواج در فرکانس‌های مختلف هستند که در آب‌های عمیق برای حالت موج کاملاً توسعه یافته به صورت روابط استاندارد پیشنهاد می‌شوند. غالب این مدل‌های استاندارد طبق رابطه (۱) هستند [۳] و [۴].

$$S(f) = \frac{A}{f^5} \exp\left(-\frac{B}{f^4}\right) \quad (1)$$

f فرکانس و A و B ثابت‌ها هستند. انتخاب مدل طیف استاندارد، به خصوصیات منطقه مورد مطالعه وابسته است برای این منظور طیف‌های پیشنهاد شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا طیف مناسب برای داده‌های خلیج فارس انتخاب شود.

طیف جونس واپ براساس مطالعات و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در دریای شمال توسط هاسلمن و همکارانش در سال ۱۹۷۳ ارائه شده است. با توجه به موقعیت جغرافیایی دریای خلیج فارس و محدود بودن

آن به سواحل اطراف، می‌توان از طیف موج جونس واپ^۴ برای امواج استفاده نمود. رابطه ریاضی این طیف طبق رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$S_{jz}(\omega_e) = 0.658 C S_{Bz}(\omega) \frac{g}{(g - 2\omega U \cos(\mu))} \quad (2)$$

U: سرعت رو به جلوی کشتی و جهت μ ، Heading نسبت به موج‌های عرضی $\mu=90$ فرض شده است. طیف دو پارامتری S_{Bz} طبق رابطه (۳) داده شده است (براساس ITTC):

$$S_{Bz} = \frac{A}{\omega^5} e^{\frac{-B}{\omega^4}} \quad (3)$$

است. $A = \frac{172.75 \bar{H}_1^3}{T^4}$ و $B = \frac{691}{T^4}$ که با ضرب معادله ۳ در $\frac{\omega_n^4}{g^2}$ ، طیف دامنه موج برابر می‌شود با طیف انرژی شیب موج.

$$S_{j\alpha}(\omega_e) = 0.658 C \frac{A}{\omega g^2} e^{\frac{(-B)}{\omega^4}} \frac{g}{(g - 2\omega U \cos(\mu))} \quad (4)$$

دامنه موج و دامنه شیب موج هر جزء موج در طیف می‌تواند به صورت روابط (۵) و (۶) بیان شود:

$$\xi_{n5} = \sqrt{2S_{jz}(\omega_n)\delta\omega} \quad (5)$$

$$\alpha_{n5} = \sqrt{2S_{j\alpha}(\omega_n)\delta\omega} \quad (6)$$

از طیف شیب موج و دامنه موج ارتفاع موج نامنظم شبیه‌سازی شده و بازه زمانی شیب می‌تواند به صورت روابط (۷) و (۸) شبیه‌سازی شود:

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{N_{freq}} \zeta_{n0} \cos(\omega_n t + \psi_n) \quad (7)$$

$$\alpha(t) = \sum_{n=1}^{N_{freq}} \alpha_{n0} \sin(\omega_n t + \psi_n) \quad (8)$$

که ω_n و ψ_n فرکانس و زاویه فاز جزء n ام موج را بیان می‌کند. این نظریه از طریق برهم نهی^۵ فرکانس تصادفی و سینوس‌های فازی، سابقه زمانی نامنظم حالت دریایی داده شده را فراهم می‌آورد. شکل (۲) ارتفاع موج بر حسب زمان را برای طیف موج جانسواپ نشان می‌دهد. عبارت نیروی F_f که به وسیله برهم نهی عبارات نیروی سینوسی مجزا توصیف می‌شود، به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود [۷]:

$$\frac{F_{40}}{A} = \frac{F_i}{\sqrt{2\pi\delta^2}} e^{-(x_n - \mu_0)^2 / 2\delta^2} \quad (9)$$

1. MATLAB
2. RMS
3. MAXSURF
4. JONSWAP
5. Superposition

که x_n فرکانس جزء n ام است، F_i دامنه نیرویی به ازای دامنه موج A برای n امین جزء است و μ فرکانس موج متوسط و δ واریانس است.

ارتفاع مشخصه موج ۱ متر، دوره تناوب متوسط موج ۴ ثانیه، زاویه هدینگ ۹۰ درجه، فرکانس زاویه‌ای مشخصه ۴ هرتز، گام فرکانس زاویه‌ای ۰.۸/۰ هرتز و ضریب نیرویی موج: ۱۰۰،۰۰۰ نیوتن فرض شده است.

۳-۲ بررسی اثر باد

نیروها و گشتاورهای وارده از طرف باد برای یک شناور متحرک با توجه به سرعت نسبی باد و زاویه برخورد به صورت رابطه (۱۰) محاسبه می‌شوند [۵]:

$$T = \frac{1}{2} \rho_a V_{rw}^2 \begin{bmatrix} C_X(Y_{rw})A_{Fw} \\ C_Y(Y_{rw})A_{Lw} \\ C_Z(Y_{rw})A_{Fw} \\ C_K(Y_{rw})A_{Lw}H_{Lw} \\ C_M(Y_{rw})A_{Fw}H_{Fw} \\ C_N(Y_{rw})A_{Lw}L_{oa} \end{bmatrix} \quad (10)$$

که ρ_a چگالی هواست و پارامترهای H_{Lw} و H_{Fw} مرکز بالای خط آب‌خور صفحات جلویی A_{Fw} و جانبی A_{Lw} هستند. پروفیل میانگین سرعت باد از پروفیل لایه مرزی ارائه‌شده توسط برت اشنایدر در سال ۱۹۶۹ تبعیت می‌کند که مطابق با رابطه (۱۱) است:

$$V_w(h) = V_{10}(h/10)^\alpha \quad (11)$$

که V_{10} سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریا و h ارتفاع از سطح آب و ضریب α برابر با ۱.۷ است. ضرایب بی‌بعد باد (C_X, C_Y, C_Z, C_K, C_M و C_N) معمولاً در ارتفاع ۱۰ متری از سطح آب به‌عنوان ارتفاع مرجع محاسبه می‌شوند. برای شناورهای سطحی معمولاً فرض می‌شود که M_{wind} و Z_{wind} برابر با صفر هستند. درحالی‌که گشتاور در جهت رول (K_{wind}) برای شناورها و سازه‌های دریایی مورد استفاده و محاسبه قرار می‌گیرند. برای شناورهای شبه زیرسطحی علاوه بر X_{wind} و Y_{wind} هر دوی N_{wind} و K_{wind} موردنیاز هستند.

ضرایب باد براساس تئوری صفحه هلمولتز-کیرششف توسط بلندرمان در سال ۱۹۹۴ محاسبه شده‌اند. بارهای وارده از طرف باد به‌وسیله ۴ پارامتر اصلی محاسبه می‌شوند که عبارتند از: مقاومت عرضی C_{Dt}

و طولی C_{Di} ، پارامتر نیروی عرضی δ و فاکتور گشتاور رول k . ضرایب مقاومت طولی در براساس رابطه (۱۷) مقیاس‌بندی شده است:

$$CD_i = CD_{iAF}(Y_w) \frac{A_{Fw}}{A_{Lw}} \quad (12)$$

با فرض مرکز مساحت برخورد جانبی به‌صورت رابطه (۱۳) که بالای خط آب‌خور قرار دارد، ضرایب باد به‌صورت رابطه (۱۴) به‌دست آمده است. در نهایت پس از جایگذاری در فرمول بالا گشتاورها و نیروهای باد به‌دست خواهند آمد.

$$(S_L, S_H) = (S_L, H_{Lw}) \quad (13)$$

$$C_X(Y_w) = -CD_i \frac{A_{Lw}}{A_{Fw}} \frac{\cos(\gamma_w)}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_i}{CD_t}\right) \sin^2(2\gamma_w)} \quad (14)$$

$$C_Y(Y_w) = CD_t \frac{A_{Lw}}{A_{Fw}} \frac{\sin(\gamma_w)}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_i}{CD_t}\right) \sin^2(2\gamma_w)}$$

$$C_K(Y_w) = kC_Y(Y_w)$$

$$C_N(Y_w) = \left[\frac{S_i}{L_{oa}} - 0.18(\gamma_w - \frac{\pi}{2}) \right] C_Y(Y_w)$$

باد با سرعت ۱۰ نات به شناوری با سطح برخورد روبه‌رویی $7A_{Fw}$ مترمربع، سطح برخورد جانبی $70/5A_{Lw}$ مترمربع، و طول ۴۷ متر را نشان می‌دهد. مقادیر عددی ثابت‌ها برای یک شناور نظامی از منبع [۵] استخراج شده‌اند.

۳-۳ معادلات دینامیکی شناور

دینامیک شناورها با استفاده از مدل عمومی زیر براساس سرعت در سال ۱۹۹۱ توسط فوسن ارائه شده است. روابط (۱۵) و (۱۶) بیانگر این مدل هستند [۵].

$$\dot{\eta} = J_\theta(\eta)v \quad (15)$$

$$J_\theta(\eta) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta & 0 & 0 & 0 \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$M_{RB}\ddot{v} + C_{RB}(v)v + g(\eta) + g_0 = \tau + \tau_{wind} + \tau_{wave}$$

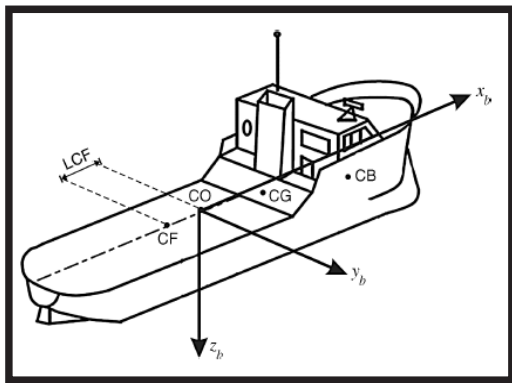
که در روابط فوق، $\tau + C_{RB}(v)v + M_{RB}\ddot{v}$ مربوط به نیروهای جسم صلب است. $g(\eta) + g$ مربوط به نیروهای هیدرواستاتیکی شامل نیروهای بویانسی و عکس‌العمل وزن است و در سمت راست تساوی $\tau + \tau_{wind} + \tau_{wave}$ به ترتیب از چپ به راست بیانگر بردار نیروهای کنترلی، نیروهای ناشی از باد و نیروهای

اعمالی از طرف امواج است. M_{RB} از رابطه (۱۷) و C_{RB} از رابطه (۱۸) به دست می‌آیند:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_g^b) \\ mS(r_g^b) & I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_g q + z_g r) & -m(x_g q - w) & -m(x_g r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_g p + w) & m(z_g r + x_g p) & -m(y_g r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_g p - v) & -m(z_g q + u) & m(x_g p + y_g q) \\ -m(y_g q + z_g r) & m(y_g p + w) & m(z_g p - v) & 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q \\ m(x_g q - w) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g q + u) & -I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x \\ m(x_g r + v) & m(y_g r - u) & -m(x_g p + y_g q) & -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

نقاط مرجع شناور در دستگاه مختصات متصل به جسم در شکل (۲) نشان داده شده‌اند:



شکل ۲: نقاط مرجع شناور در دستگاه مختصات متصل به جسم

در شکل (۲) مرکز بویانسی، CF مرکز شناوری، CG مرکز ثقل و CO مبدا دستگاه مختصات متصل به جسم هستند. بردارهای مکان و سرعت عمومی و نیروها و گشتاورهای وارده بر شناور نیز به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) و رابطه (۲۱) هستند:

$$(19) \quad \eta = [n, e, d, \phi, \theta, \psi]^T$$

$$(20) \quad v = [u, v, w, p, q, r]^T$$

$$(21) \quad \tau_i = [X_i, Y_i, Z_i, K_i, M_i, N_i]^T$$

که X_i نیروی سرج، Y_i نیروی اسوی و Z_i نیروی هیو هستند و K_i گشتاور رول، M_i گشتاور پیچ و N_i گشتاور یاو هستند. تمامی گشتاورها حول O_b گرفته شده‌اند. تابع انتقال $J(\eta)$ سرعت‌های بیان‌شده در دستگاه مختصات متصل به شناور را در دستگاه مختصات مرجع بازگو می‌کند که منحنی مسیر حرکت شناور

که متغیرهای برداری η و v بیانگر سرعت در دستگاه مختصات مرجع و سرعت در دستگاه مختصات متصل به شناور هستند و τ_c ، τ_h و τ_d به ترتیب بیانگر نیروهای هیدرودینامیکی، کنترلی و اغتشاشی هستند. برای توصیف حرکت شناور دستگاه مختصات متصل به جسم $\{b\}$ در نقطه O_b بر روی شناور ثابت شده است و دستگاه مختصات جغرافیایی $\{n\}$ نیز در نقطه O_n در سطح آب جانمایی شده‌اند. این دستگاه‌های مختصات مرجع در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.

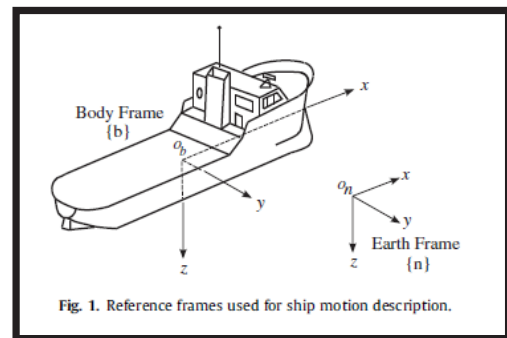


Fig. 1. Reference frames used for ship motion description.

شکل ۱: دستگاه مختصات مرجع مورد استفاده برای توصیف حرکت کشتی

را می‌دهد. ماتریس M_{RB} در معادله دوم ماتریس جرمی جسم صلب است و $C_{RB}(v)$ ماتریس شتاب جانب مرکز است و $C_{RB}(v)v$ به‌عنوان برآیند بردار سرعت دستگاه مختصات در حال چرخش بیان شده است. برای حل معادلات حرکت کشتی باید ابتدا معادلات سرعت در دستگاه مختصات متصل به جسم حل شده

و سرعت‌های شناور با استفاده از رابطه (۱۵) به‌دست آیند، سپس با استفاده از تابع انتقال و حل رابطه (۱۶) سرعت‌های بیان‌شده در دستگاه مختصات متصل به شناور را در دستگاه مرجع بیان نمود. پس برای حل اگر رابطه (۱۶) بسط داده شود، رابطه (۲۲) به‌دست می‌آید:

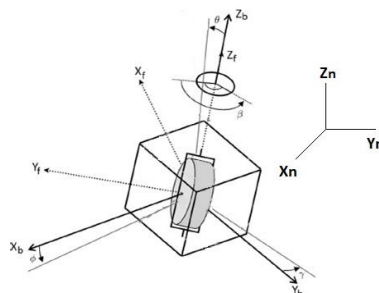
$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + y_g(pq + \dot{q})) &= X \\ m(\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})) &= Y \\ m(\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})) &= Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (rp - \dot{q})I_{xy} + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xz} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] &= N \end{aligned} \quad (22)$$

برای حل رابطه (۲۲) می‌توان فرض‌هایی در نظر گرفت و معادلات را ساده‌سازی نمود. در صورتی‌که شناور نسبت به صفحه $x-z$ (port-starboard) متقارن باشد $I_{xy} = I_{yz} = 0$ شده و اگر نسبت به صفحه $y-z$ (fore-aft) متقارن باشد نتیجه می‌گیریم $I_{xy} = I_{xz} = 0$. و اینکه اگر مبدا دستگاه مختصات متصل به شناور (CO) بر مرکز ثقل شناور (CG) منطبق باشد، آنگاه مقادیر x_g, y_g, z_g صفر خواهد شد و رابطه (۲۲) به‌صورت رابطه (۲۳) ساده می‌شود:

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr + wq) &= X \\ m(\dot{v} - wp + ur) &= Y \\ m(\dot{w} - uq + vp) &= Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr &= K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp &= M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq &= N \end{aligned} \quad (23)$$

۳-۴ معادلات دینامیکی ژایرواستابلاایزر

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، برای توصیف سیستم ژایروسکوپی، دستگاه‌های مختصات راستگرد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].



شکل ۳: تعریف دستگاه مختصات برای حل دینامیک ژایرواستابلاایزر

(X_n, Y_n, Z_n) : دستگاه مختصات متصل به زمین یا دستگاه مختصات مرجع است.

(X_b, Y_b, Z_b) : دستگاه مختصات متصل به قایق است که ثابت است.

(X_p, Y_p, Z_p) : دستگاه مختصات چرخ طیار است. این دستگاه مختصات حرکت تقدیمی دارد ولی همراه با چرخ طیار چرخشی ندارد.

با فرض اینکه اجزای چرخ طیار حول X_f محصور شده‌اند و حول X_f می‌چرخند و حرکت تقدیمی در راستای Z_f است و چرخ طیارها مرکز جرم‌هایی مشابه دارند که در مبدا دستگاه‌های مختصات مرجع قرار دارند و دستگاه‌های مختصات مرجع جسم با محورهای اصلی اینرسی جسم‌ها روی هم قرار می‌گیرند. بنابراین سرعت چرخ طیار مطابق با رابطه (۲۴) به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Rightarrow f({}^n w_d) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \psi \\ 0 \end{Bmatrix} + R_b^f \begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix} f(I(R_f^b)^T) \quad (24)$$

با انجام اعمال ریاضی در نهایت، گشتاور اعمالی پیرامون (X_b, Y_b, Z_b) می‌تواند به‌صورت رابطه (۲۵) بیان شود:

$$M_x = I_x(\ddot{\beta} \cdot c^2\beta - \dot{\beta} \cdot s2\beta \cdot p) + \frac{1}{2}I_x(\dot{q} \cdot s2\beta + 2 \cdot \dot{\beta} \cdot c2\beta \cdot q) + I_y(\dot{p} \cdot s^2\beta + \dot{\beta} \cdot s2\beta \cdot p) - \frac{1}{2}I_y(\dot{q} \cdot s2\beta + 2\dot{\beta} \cdot c2\beta \cdot q) - I_y(\ddot{\psi} \cdot s\beta + \dot{\beta} \cdot c\beta \cdot \dot{\psi}) - \frac{1}{2}I_x(r \cdot p \cdot s2\beta) - I_x(r \cdot q \cdot s^2\beta) + \frac{1}{2}I_y(r \cdot p \cdot s2\beta) - I_y(r \cdot q \cdot c^2\beta) - I_y(r \cdot c\beta \cdot \dot{\psi}) + I_z \cdot r \cdot q + I_z \cdot \dot{\beta}q \quad (25)$$

$$M_y = \frac{1}{2}I_x(\dot{p} \cdot s2\beta + 2 \cdot \dot{\beta} \cdot c2\beta \cdot p) + I_x(\dot{q} \cdot s^2\beta + \dot{\beta} \cdot s2\beta \cdot q) - \frac{1}{2}I_y(\dot{p} \cdot s2\beta + 2\dot{\beta} \cdot c2\beta \cdot p) + I_y(\dot{q} \cdot c^2\beta - \dot{\beta} \cdot s2\beta \cdot q) + I_y(\ddot{\psi} \cdot c\beta - \dot{\beta} \cdot s\beta \cdot \dot{\psi}) + I_x(r \cdot p \cdot c^2\beta) + \frac{1}{2}I_x(r \cdot q \cdot s2\beta) + I_y(r \cdot p \cdot s^2\beta) - \frac{1}{2}I_y(r \cdot q \cdot s2\beta) - I_y(r \cdot s\beta \cdot \dot{\psi}) - I_z \cdot r \cdot p - I_z \cdot \dot{\beta}$$

$$M_z = I_z \cdot \dot{r} + I_z \cdot \ddot{\beta} - I_x(q \cdot p \cdot c^2\beta) - \frac{1}{2}I_x(q^2 \cdot s2\beta) + \frac{1}{2}I_x(p^2 \cdot s2\beta) + I_x(p \cdot q \cdot s^2\beta) - I_y(p \cdot q \cdot s^2\beta) + \frac{1}{2}I_y(q^2 \cdot s2\beta) + I_yq \cdot \dot{\psi} \cdot s\beta - \frac{1}{2}I_y(p^2 \cdot s2\beta) + I_y(p \cdot q \cdot c^2\beta) + I_y(p \cdot c\beta \cdot \dot{\psi})$$

۳-۵ معادلات دینامیکی جرم جابه‌جاشونده

جرم جابه‌جاشونده تنها در جهت y حرکت می‌کند. شتاب آن نسبت به زمین در دستگاه مختصات متصل به شناور به صورت رابطه (۲۶) است:

دو دستگاه مختصات متصل به شناور و دستگاه مختصات مرجع یا متصل به زمین برای توصیف حرکات شناور و وزنه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷].

$$a_w = \dot{u}(t)i + \dot{v}(t)j + \dot{w}(t)k + \omega \times (v_0 + 2\dot{d}j + \omega \times r_w) + \alpha \times r_w + \ddot{d}j$$

شتاب جرم جابه‌جاشونده پس از بسط عناصر تشکیل دهنده آن به صورت رابطه (۲۷) بیان می‌شود:

$$\Rightarrow a_w = (q \cdot w + q \cdot p \cdot d - q^2 \cdot x - r \cdot v - 2r \cdot \dot{d} + r \cdot p \cdot z - r^2 \cdot x + \dot{q} \cdot z - \dot{r} \cdot d + \dot{u})i + (-p \cdot w - p^2 \cdot d + p \cdot q \cdot x + r \cdot u + r \cdot q \cdot z - r^2 \cdot d - \dot{p} \cdot z + \dot{r} \cdot x + \ddot{d} + \dot{v})j + (p \cdot v + 2p \cdot \dot{d} - p^2 \cdot z + r \cdot p \cdot x - q \cdot u - q^2 \cdot z + r \cdot q \cdot d + \dot{p} \cdot d - \dot{q} \cdot x + \dot{w})k \quad (27)$$

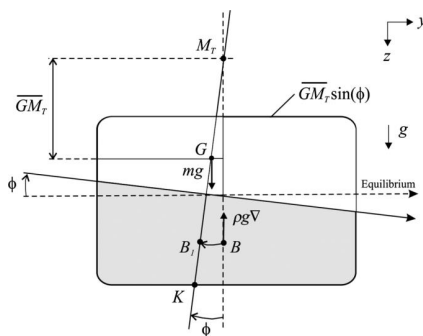
در نهایت نیروها و گشتاور به وجود آمده در اثر جابه‌جایی جرم به ترتیب در رابطه (۲۸) و (۲۹) بیان می‌شود:

$$\Rightarrow F_w = m'(a_w - g) = m'(g_x - (q \cdot w + q \cdot p \cdot d - q^2 \cdot x - r \cdot v - 2r \cdot \dot{d} + r \cdot p \cdot z - r^2 \cdot x + \dot{q} \cdot z - \dot{r} \cdot d + \dot{u}))i + m'(g_y - (-p \cdot w - p^2 \cdot d + p \cdot q \cdot x + r \cdot u + r \cdot q \cdot z - r^2 \cdot d - \dot{p} \cdot z + \dot{r} \cdot x + \ddot{d} + \dot{v}))j + m'(g_z - (p \cdot v + 2p \cdot \dot{d} - p^2 \cdot z + r \cdot p \cdot x - q \cdot u - q^2 \cdot z + r \cdot q \cdot d + \dot{p} \cdot d - \dot{q} \cdot x + \dot{w}))k \quad (28)$$

$$\Rightarrow M_w = (z_w \cdot F_w^y - d \cdot F_w^z)i + (x_w \cdot F_w^z - z_w \cdot F_w^x)j + (d \cdot F_w^x - x_w \cdot F_w^y)k \quad (29)$$

با فرض اینکه فاصله عمودی و افقی جرم جابه‌جاشونده از مرکز ثقل شناور صفر است (یعنی: x و z صفر هستند). رابطه شتاب جرم جابه‌جاشونده به صورت رابطه (۳۰) بیان می‌شود:

$$\Rightarrow a_w = (q \cdot w + q \cdot p \cdot d - r \cdot v - 2r \cdot \dot{d} - \dot{r} \cdot d + \dot{u})i + (-p \cdot w - p^2 \cdot d + r \cdot u - r^2 \cdot d + \ddot{d} + \dot{v})j + (p \cdot v + 2p \cdot \dot{d} - q \cdot u + r \cdot q \cdot d + \dot{p} \cdot d + \dot{w})k \quad (30)$$



شکل ۴: برش عرضی از شناور

که m' جرم جسم جابه‌جا شونده است.

۳-۶ محاسبات بارهای هیدرواستاتیکی وارد بر شناور

با توجه به شکل (۴) نیروها و گشتاورهای بازپس‌دهی شناور را می‌توان به صورت رابطه (۳۱) نوشت [۵]:

که $N_{thruster}$ تعداد تراسترهای جانبی است و اجزای CR از مرجع (۸) به‌دست می‌آید.

(۳۵)

$$\begin{aligned} C_{R,standard} &= c_{11} + c_{12}F_n + c_{12}F_n^2 + C_B \cdot (c_{21} + c_{22}F_n + c_{23}F_n^2) + \\ &C_B^2 \cdot (c_{31} + c_{32}F_n + c_{33}F_n^2) \\ C_{R,Fnkrit} &= \max(1.0(F_n/F_{n,krit})^{f1} \\ F_{n,krit} &= d_1 + d_2C_B + d_2C_B^2 \\ k_L &= e_1L^2 \end{aligned}$$

ضرایب موجود در رابطه ۳۵ از مرجع [۸] به‌دست می‌آید.

محدوده اعتبارار روش هولنباخ و محدوده پارامترهای هندسی در روش هولنباخ از مرجع [۸] به‌دست می‌آید. برای بدنه‌هایی که خوب طراحی شده باشند، استفاده از رابطه (۳۶) مناسب‌تر است:

$$C_R = C_{R,standard} \cdot \left(\frac{T}{B}\right)^{a1} \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{a2} \cdot \left(\frac{L_{os}}{L_{wl}}\right)^{a3} \cdot \left(\frac{L_{wl}}{L}\right)^{a4} \quad (36)$$

ضرایب رابطه (۳۶) و محدوده کمینه و بیشینه مقدار عدد فرود را می‌توان از مرجع [۸] مشاهده کرد.

۳-۸ نیروها و گشتاورهای وارده به شناور از طرف پروانه و سکان

روش‌های تجربی در محاسبات مانور کشتی یکی از روش‌های رایج است، روشی که کیجیما ارائه کرده از روش‌های متداول و شناخته‌شده است. محاسبات مربوط به پروانه و سکان از روابط استخراج‌شده توسط کیجیما استخراج شده است. در محاسبه نیروها و گشتاورهای پروانه ابتدا لازم است فرض کنیم از گشتاور ایجادشده توسط پروانه صرف‌نظر می‌کنیم زیرا در مقایسه با سایر گشتاورهای تولیدشده در سیستم کوچک است. لذا تنها نیروی جلوبرنده پروانه محاسبه می‌شود. همچنین می‌توان متذکر شد که در شناورهای با دوپروانه، گشتاور تولیدشده توسط پروانه‌ها با یکدیگر خنثی می‌شوند. در رابطه (۳۷) نیروی رانش ایجادشده توسط پروانه نشان داده شده است:

$$F = (1 - t_p) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D_p^4 \cdot K_T \quad (37)$$

در رابطه (۳۷) D_p قطر پروانه، n دور چرخش پروانه، t_p فاکتور کاهش تراست، K_T ضریب تراست است.

که t_p فاکتور کاهش تراست C_B ضریب بدنه و K_T ضریب تراست به‌صورت زیر از روی نمودار مخصوص به هر

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} -\rho g \int_0^z A_{wp}(\xi) d\xi \sin(\theta) \\ \rho g \int_0^z A_{wp}(\xi) d\xi \cos(\theta) \sin(\phi) \\ \rho g \int_0^z A_{wp}(\xi) d\xi \cos(\theta) \cos(\phi) \\ \rho g \sqrt{GM_T} \sin(\phi) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ \rho g \sqrt{GM_L} \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ \rho g \sqrt{-GM_L \cos(\theta) + GM_T} \sin(\phi) \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (31)$$

۳-۷ محاسبات بارهای ناشی از نیروی مقاومت هیدرودینامیکی شناور [۸]

روش هولنباخ از آزمایش ۴۳۳ نوع کشتی در حوضچه کشتش برای بدنه‌های مدرن امروزی به‌دست آمده است. این روش بهترین روش برای بدنه‌های امروزی است. در استفاده از روابطی که در این روش ارائه می‌شود. سطح خیس بدنه کشتی از رابطه (۳۲) به‌دست می‌آید:

$$S_{total} = k \cdot L \cdot (B + 2 \cdot T) \quad (32)$$

$$k = a_0 + a_1 \cdot \frac{L_{os}}{L_{wl}} + a_2 \cdot \frac{L_{wl}}{L} + a_3 \cdot C_B + a_4 \cdot \frac{B}{T} + a_6 \cdot \frac{L}{T} + a_7 \cdot \frac{T_A - T_F}{L} + a_8 \cdot \frac{D_P}{T} + K_{Rudd} \cdot N_{Rudd} + K_{Brac} \cdot N_{Brac} + K_{Boss} \cdot N_{Boss}$$

ضرایب موجود در رابطه ۳۲ و عدد فرود موجود در روابط بعدی بر اساس طول L_{fin} می‌باشد که از مرجع [۸] استخراج می‌شود.

$$L_{fin} = L_{os} \quad , \quad \frac{L_{os}}{L} < 1 \quad (33)$$

$$L_{fin} = L + \frac{2}{3} \cdot (L_{os} - L) \quad , \quad 1 \leq \frac{L_{os}}{L} < 1.1$$

$$L_{fin} = 1.0677 \cdot L \quad , \quad 1.1 \leq \frac{L_{os}}{L}$$

مقاومت اصطکاکی از فرمول ITTC-57 به‌دست می‌آید. با محاسبه مقاومت باقیمانده از روش هولنباخ می‌توان مقاومت کل شناور را بوسیله رابطه ۳۴ محاسبه کرد.

$$R_R = C_R \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot (B \cdot T / 10) \quad (34)$$

$$C_R = C_{R,standard} \cdot C_{R,Fnkrit} \cdot k_L \cdot \left(\frac{T}{B}\right)^{b1} \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{b2} \cdot \left(\frac{L_{os}}{L_{wl}}\right)^{b3}$$

$$\left(\frac{L_{wl}}{L}\right)^{b4} \cdot \left(1 + \frac{T_A - T_F}{L}\right)^{b5} \cdot \left(\frac{D_P}{T_A}\right)^{b6} \cdot (1 + N_{Rudd})^{b7} \cdot (1 + N_{Brac})^{b8}$$

$$(1 + N_{Boss})^{b9} \cdot (1 + N_{Thruster})^{b10}$$

پروانه به دست می آید. ضریب و یک پروانه از رابطه (۳۸) و سرعت پیشروی از رابطه (۳۹) محاسبه می شود:

$$\text{wake} = 0.5 - \text{CB} \quad (38)$$

$$\text{VA} = v \cdot (1 - \text{wake}) \quad (39)$$

در رابطه (۳۹) سرعت حرکت شناور است و با داشتن ضریب پیشروی که به وسیله رابطه (۴۰) به دست می آید از روی نمودار سازنده پروانه، K_p پروانه به دست می آید.

$$\text{JP} = \frac{\text{VA}}{n \cdot \text{Dp}} \quad (40)$$

نیروهای وارده از طرف سکان در دو جهت x و y و گشتاورهای وارده از طرف سکان در دو جهت رول و یاو قابل ملاحظه است، لذا از محاسبه نیروها و گشتاورهای دیگر، صرف نظر شده است. نیروها و گشتاورهای وارده از طرف سکان در رابطه (۴۱) تعریف شده اند:

$$(41)$$

$$F_{\text{surge}} = -F_N \cdot \sin(\text{zeta})$$

$$F_{\text{sway}} = -(1 + Ah) F_N \cdot \cos(\text{zeta})$$

$$T_{\text{Roll}} = (1 + Ah) F_N \cdot Z_R \cdot \cos(\text{zeta})$$

$$T_{\text{Yaw}} = -(1 + Ah) F_N \cdot X_R \cdot \cos(\text{zeta})$$

FN از رابطه (۴۲) به دست می آید.

$$(42)$$

$$F_N = 0.5 \cdot \text{Rho} \cdot \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} A_R \cdot v_R^2 \cdot \sin(\alpha_R)$$

در رابطه (۴۲) V_R سرعت نسبی مفید ناشی از سرعت سیال ورودی به پروانه است.

R_{α} زاویه حمله، A_R سطح سکان، ضریب منظری، Rho چگالی آب، zeta زاویه سکان، A_h تابعی از CB، XR و به ترتیب فاصله عمودی و افقی از مرکز ثقل شناور هستند.

۳-۹ معیارها و محدودیت های عملیات های نظامی شناورها [۲]

برای تعیین سطح ایمن و محدوده مجاز عملکرد در یامانی یک شناور نظامی در عملیات های نظامی از جمله پرواز و فرود هلیکوپتر (STOVL)، عملیات در نزدیک شناور (مانند سوخت گیری هلیکوپتر در پرواز) و جابه جایی بر روی عرشه شناور (مانند سوخت گیری بر روی عرشه) و عملیات جابه جایی سوخت، محموله و ... در دریا شامل جابه جایی با اتصال^۸، سوخت گیری در دریا و جابه جایی عمودی و عملیات سامانه سلاح شامل عملکرد رادار و سونار، عملکرد سلاحها، جابه جایی و پرتاب موشک و اژدر، استاندارد ناتو معیارهای زیر را تعیین کرده است که لازم است برای پایداری رول در نظر گرفته شود.

محدودیت های مربوط به پرواز و فرود عمودی (STOVL, VTOL) به عنوان مقادیر RMS حرکت رول در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: معیارهای پرواز و فرود هلیکوپتر [۲]

محدودیت عملیاتی			نوع عملکرد
موقعیت	محدودیت	حرکت	
	۲٫۵ درجه	رول	پرواز هلیکوپتر
	۲٫۵ درجه	رول	پرواز کوتاه ^۹
	۲٫۵ درجه	رول	فرود هلیکوپتر
محل فرود	۱ متر بر ثانیه	سرعت عمودی	
تمام محدودیت ها از دامنه RMS استخراج می شود.			

7. Short Take-Off Vertical Landing
8. Connected replenishment (CONREP)
9. Short takeoff



محدودیت‌های مربوط جابه‌جایی هلیکوپتر و STOVL به‌عنوان مقادیر RMS حرکت رول در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: معیارهای جابه‌جایی هلیکوپتر و STOVL [۲]

محدودیت عملیاتی	
محدودیت	حرکت
۱٫۸ درجه	رول
تمام محدودیت‌ها از دامنه RMS استخراج می‌شود.	

محدودیت‌های جابه‌جایی با اتصال بین دو شناور در جدول (۳) به‌عنوان مقادیر RMS حرکت رول برای معیارهای عوامل انسانی تعریف‌شده در MSI و MII ارائه شده است.

جدول ۳: معیارهای جابه‌جایی با اتصال [۲]

محدودیت عملیاتی			پارامترهای محدودکننده
موقعیت	محدودیت	حرکت	
	۲٫۲ درجه	رول	تجهیزات: زاویه سرخوردگی روی Pallet truck ^{۱۰}
محدودیت‌های رول از دامنه RMS استخراج می‌شود.			

محدودیت‌های بارگیری عمودی برای بالگرد در جدول (۵) به‌عنوان مقادیر RMS حرکت رول ارائه شده است.

جدول ۵: معیارهای بارگیری عمودی [۲]

محدودیت عملیاتی			پارامترهای محدودکننده
موقعیت	محدودیت	حرکت	
	۱٫۶ درجه	رول	تجهیزات: زاویه شیب کانینر حمل موشک ^{۱۱}
محدودیت‌های رول و پیچ، جابه‌جایی عمودی و سرعت عمودی از دامنه RMS استخراج می‌شود.			

معیارهای طراحی برای پرتاب موشک هدایت‌شونده و موشک عمود پرتاب در جدول (۶) و (۷) ارائه شده است.

جدول ۶: معیارهای سیستم موشک هدایت‌شونده [۲]

محدودیت عملیاتی		محدودیت زیرسیستم‌ها
محدودیت	حرکت	
۳٫۸ درجه	رول یا پیچ	پرتاب‌کننده ^{۱۲}
۳٫۸ درجه	رول یا پیچ	عملکرد جابه‌جایی خودکار موشک
۲٫۵ درجه	رول یا پیچ	عملکرد جابه‌جایی دستی موشک
۱٫۳ درجه	رول یا پیچ	بارگذاری مجدد موشک ^{۱۳}
محدودیت‌ها از دامنه RMS استخراج می‌شود.		

10. Pallet truck slip angle
11. Missile dolly slip angle
12. Launcher
13. Missile reloading

جدول ۷: معیارهای سیستم موشک عمود پرتاب [۲]

محدودیت عملیاتی			عملیات
موقعیت	محدودیت	حرکت	
	۸٫۸ درجه	رول	پرتاب
	۱٫۳ درجه	رول	بارگذاری مجدد موشک برای ۱۰ موشک در ساعت
	۳٫۸ درجه	رول	بارگذاری مجدد موشک برای ۳ موشک در ساعت

محدودیت‌ها از دامنه RMS استخراج می‌شود.

سنگین‌تر باید بر روی نوارنقاله حمل شوند، بنابراین معیارهای آن‌ها تا حدی سخت‌تر از نمونه‌هایی است که با دست حمل می‌شوند.

معیارهای عملکرد سیستم اژدر در جدول (۸) ارائه شده است. اژدر در هنگام پرتاب، فقط توسط حرکات شناور محدود نمی‌شود. به‌طور نمونه اژدرها و موشک‌های

جدول ۸: معیارهای سیستم اژدر [۲]

محدودیت عملیاتی		محدودیت زیر سیستم‌ها
محدودیت	حرکت	
۳٫۸ درجه	رول یا پیچ	پرتاب‌کننده
۱٫۳ درجه	رول یا پیچ	بارگذاری اژدر بر روی نوار نقاله
۱٫۵ درجه	رول یا پیچ	بارگذاری اژدر به‌صورت دستی
۳٫۸ درجه	رول یا پیچ	بارگذاری مستقیم به‌صورت خودکار

محدودیت‌ها از دامنه RMS استخراج می‌شود.

محدوده مجاز حرکت رول، پیچ و سرعت عمودی برای عملکرد صحیح این نوع سلاح، در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول ۹: معیارهای توپ‌ها [۲]

محدودیت عملیاتی			نمونه توپ
موقعیت	محدودیت	حرکت	
	۳٫۸ درجه	رول	۵ اینچ / ۵۴

محدودیت‌ها از دامنه RMS استخراج می‌شود.

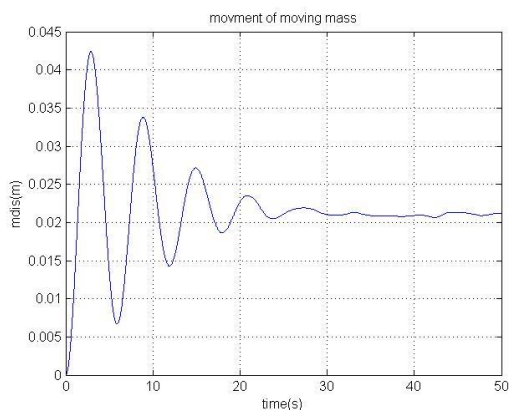
۴ بحث و نتیجه‌گیری

بیشتر مقالاتی که تا به حال در زمینه دریامانی و پایداری شناور به چاپ رسیده، کنترل رول شناور را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. برای سادگی از مدل‌های یک درجه آزادی، ۳ درجه آزادی و ۴ درجه آزادی برای حل معادلات حرکت استفاده کرده‌اند. در این مقاله علاوه بر حل معادلات حرکت کشتی در ۶ درجه آزادی سعی شده تا با وارد آوردن اثرات باد شرایط محیطی مدل نسبت به کارهای دیگران کامل‌تر باشد.

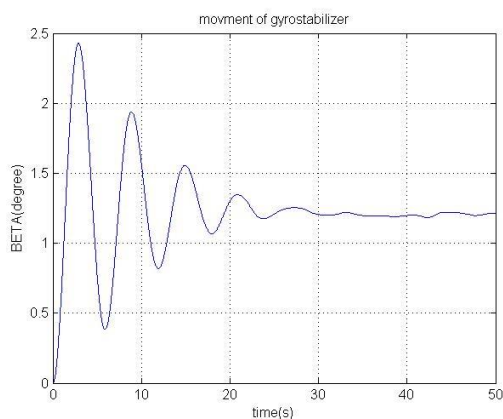
برای حل معادلات از انتگرال‌گیری به روش رانج کوتا با گام‌های انتگرال‌گیری ثابت استفاده شده و برای صحت‌گذاری کدنویسی صورت‌گرفته در نرم‌افزار متلب از نرم‌افزار مکسرف برای صحت‌گذاری خروجی‌ها استفاده شده است. بدین ترتیب که مجذور میانگین مربعات حرکت رول از خروجی کد متلب نوشته‌شده با خروجی نرم‌افزار مکسرف که برای شناور حاضر این مقدار ۱٫۲ است، مقایسه شده است. راهبرد کنترلی مورد استفاده برای کنترل ژایرواستابلایزر و

جرم جابه‌جا شونده بسیار ساده، سریع و در عین حال کارآمد است. بدین ترتیب با گرفتن فیدبک از میزان جابه‌جایی و نرخ حرکت رول کشتی و انتخاب ضرایب مشخص که به‌صورت سعی و خطا به‌دست آمده است، میزان جابه‌جایی و نرخ ژایرواستابلایزر و جرم جابه‌جاشونده تعیین به‌دست آمده و سیستم در جهت کاهش حرکت شناور در جهت رول به‌صورت مخالف عمل می‌کند. با این کار نیاز به سیستم‌های کنترلی پیشرفته، مرتفع شده و با یک دستگاه حرکت‌سنج سه‌بعدی می‌توان فرامین کنترلی پایدارساز رول را صادر نمود. شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب بیانگر میزان رول شناور و نرخ تغییرات آن در شرایطی که از پایدارسازها استفاده نمی‌شود، هستند.

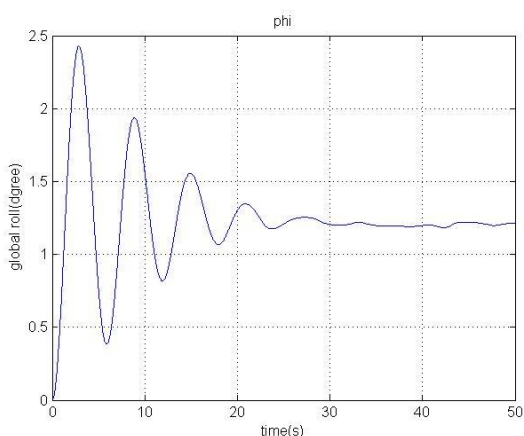
دور بردقیقه می‌چرخد را برای کاهش دامنه رول شناور نشان می‌دهند و شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب بیانگر میزان رول شناور و نرخ تغییرات آن در شرایطی که از پایدارسازها استفاده شده است، هستند.



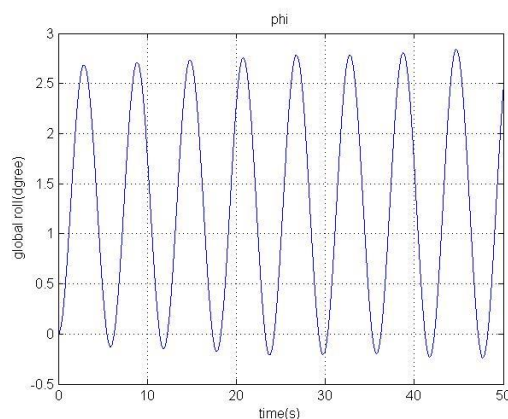
شکل ۷: جابه‌جایی جسم جابه‌جاشونده در جهت عرض شناور



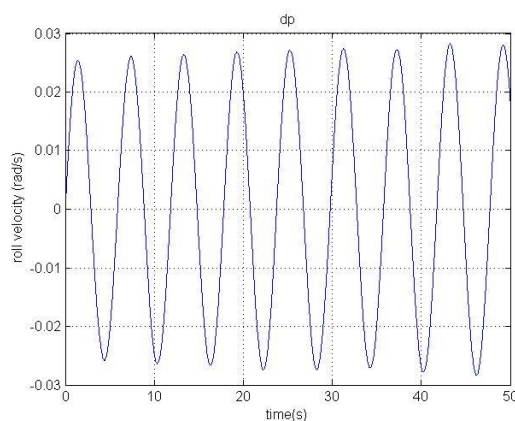
شکل ۸: چرخش قاب ژایرواستابلایزر



شکل ۹: حرکت رول شناور با اعمال پایدارسازها



شکل ۵: حرکت رول شناور بدون اعمال پایدارسازها



شکل ۶: نرخ حرکت رول شناور بدون اعمال پایدارسازها

شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب میزان جابه‌جایی جسم جابه‌جاشونده ۲۰۰۰ کیلوگرمی و چرخش قاب ژایرواستابلایزر ۴۰۰ کیلوگرمی که با سرعت ۱۰۰۰۰

مبنای طیف حاصل از شرایط حدی منطقه خلیج فارس در دوره بازگشتهای مختلف "پنجمین همایش ملی صنایع فرا ساحل، ۱۳۹۲

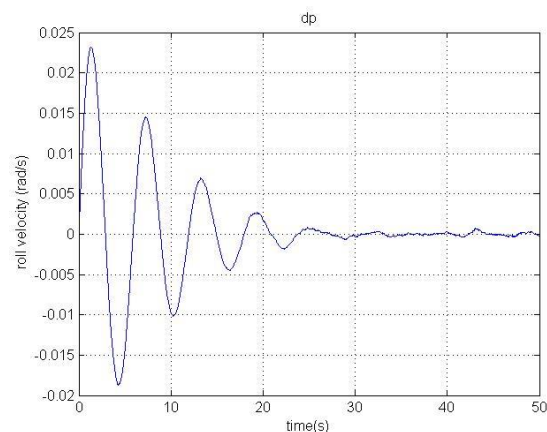
[۴] علیرضا روشن بین، "بررسی تاثیر مشخصات امواج دریا در حرکات شناورهای تندرو" همایش صنایع دریایی، ۱۳۸۵

[5] T. I. Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, First Edit. 2011, p. 582.

[6] N. C. Townsend and R. A. Sheno, "Control Strategies for Marine Gyrostabilizers," IEEE J. Ocean Engineering., vol. 39, no. 2, pp. 243–255, 2014.

[7] T. W. Treacle, D. T. Mook, and A. H. Nayfeh, "A time-domain method to evaluate the use of moving weights to reduce the roll motion of a ship," Ocean Engineering., vol. 27, pp. 1321–1343, 2000.

[۸] محمد مونسان، "کتاب جامع مهندسی معماری دریایی، انتشارات کانون پژوهش ۱۳۸۸



شکل ۱۰: نرخ حرکت رول شناور بدون اعمال پایدارسازها

مجدور میانگین مربعات حرکت رول در حالت اول ۷۲۵۴/۱ بوده و مجدور میانگین مربعات حرکت رول در حالت دوم ۵۰۴۳/۱ است. با توجه به اینکه این پارامتر در حالت دوم کاهش پیدا کرده است، می توان نتیجه گرفت محاسبات و شبیه سازی انجام شده خطای کمی داشته و فرض های ساده سازی به میزان ۳/۰ اختلاف با نرم افزار مکسرف را نشان می دهند. نظر به اینکه دامنه نوسانات و نرخ حرکت رول در حالت دوم کاهش چشمگیر و سریعی داشته ، می توان این روش را مناسب ارزیابی کرد. با توجه به محدودیت های موجود در وزن و میزان جابه جایی ها باید این نکته را نیز در نظر گرفت که با توجه به این که وزن جابه جایی شناور مورد ارزیابی قرار گرفته ۲۰۳۰۰۰ کیلوگرم است لذا مجموع وزن این دو سیستم تقریباً یک درصد وزن شناور را شامل می شود که مقدار قابل قبولی برای این کار است. با توجه به استاندارد ناتو در خصوص عملیات های ویژه ی نظامی بر روی شناورهای نظامی و مقایسه دامنه نوسانات رول، پایدارسازی به انجام عملیات های نظامی منجر می شود.

۵ منابع

[1] T. Perez and M. Blanke, "Ship roll damping control," Annu. Rev. Control, vol. 36, no. 1, pp. 129–147, Apr. 2012.

[2] NATO Unclassified_STANAG 4154 (Edition 3), Part7&8, December 2000.

[۳] و. جهانمرد، م. داستان، م. ت. پور، م. س. سیف و ح. مهدیقلی، "تولید رکورد تاریخچه زمانی امواج بر